

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра физики и методики преподавания физики

В.Н. Макаров, А.А. Воронцов, А.Г. Четверикова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХОЛОДИЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА УСТАНОВКИ С ПОМОЩЬЮ ЭФФЕКТА ПЕЛЬТЬЕ

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательные области «Математические и естественные науки» и «Инженерное дело, технологии и технические науки»

Оренбург
2019

УДК 537.8(076.5)

ББК 22.31я7

М15

Рецензент – профессор кафедры общей физики, доктор физико-математических наук, профессор Н.А Манаков.

Макаров, В.Н.

М15 Определение холодильного коэффициента установки с помощью эффекта Пельтье: методические указания/ В.Н. Макаров, А.А.Воронцов, А.Г. Четверикова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019.

Методические указания к лабораторной работе по физике включают в себя описание основных положений методики определения холодильного коэффициента установки с помощью эффекта Пельтье.

Методические указания предназначены для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательные области «Математические и естественные науки» и «Инженерное дело, технологии и технические науки».

УДК 537.8(076.5)

ББК 22.31я7

© Макаров В.Н.,
© Четверикова А.Г.,
© Воронцов А.А., 2019
© ОГУ, 2019

Содержание

1 Цель работы	4
2 Теоретическая часть.....	4
3 Методика эксперимента	12
4 Порядок выполнения работы	14
5 Вопросы для самопроверки.....	17
6 Рекомендуемая литература	18

1 Цель работы

1. Ознакомиться с термодинамическим описанием круговых процессов.
2. Экспериментально определить значение холодильного коэффициента.
3. Рассчитать холодильный коэффициент системы, работающей по циклу Карно.

Приборы и принадлежности: лабораторная холодильная установка, состоящая из выпрямителя, микрохолодильника и рабочего вещества (воздуха).

2 Теоретическая часть

В технике нашли широкое распространение тепловые машины и насосы, а также холодильные установки, рабочее вещество в которых претерпевает циклические изменения. *Тепловые машины* служат для превращения теплоты в механическую работу, а *холодильные установки* – для отнятия теплоты от менее нагретых тел и передачи ее более нагретым телам за счет совершения работы внешними силами. Объект, непосредственно служащий для превращения теплоты в работу или переброса теплоты от менее к более нагретым телам, называется *рабочим телом*.

Теоретическое рассмотрение преобразования теплоты в работу и наоборот в таких устройствах базируется на термодинамическом равновесии циклических процессов, происходящих с рабочим телом. Одной из целей данной работы является уяснение сути термодинамического подхода к анализу круговых процессов на примере обратимого цикла Карно, когда в качестве рабочего тела взят один моль идеального газа. В связи с этим перечислим термодинамические понятия, используемые при таком анализе.

Давление p , температура T , и объем V рабочего тела называются термодинамическими параметрами. Они однозначно определяют равновесное

состояние рабочего вещества. Состояние называется равновесным, когда оно остается неизменным сколь угодно долго при постоянных внешних условиях. Важной особенностью термодинамического состояния является то, что оно может быть изображено графически, если вдоль координатных осей откладывать p и V , V и T или другую пару термодинамических параметров или (как их еще называют) потенциалов.

Переход системы из одного состояния в другое называется термодинамическим процессом, который может быть *равновесным* или *неравновесным*.

Равновесный процесс протекает настолько медленно, что система в любой момент времени сохраняет состояние равновесия. Это возможно, когда выравнивание внутренних характеристик системы протекает значительно быстрее скорости изменения внешних условий. Характерным для равновесных процессов является то, что они могут в принципе проведены в обратном направлении через те же состояния. Графически равновесные процессы изображаются линией, соединяющей исходное и конечные состояния. Если внутренние механизмы типа диффузии, теплоотдачи, и т. п. не успевают восстановить равновесие системы по мере изменения внешних условий, то реализуются *неравновесные процессы*.

После введения основных понятий рассмотрим произвольный циклический равновесный процесс, изображенный на рисунке 1, а. В начальный момент рабочее вещество (моль идеального газа) находилось в состоянии 1 (p_1, V_1). Затем газ равновесно расширился вдоль кривой $1a2$ до состояния 2 (p_2, V_2) и совершил работу A_{12} , равную

$$A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV . \quad (1)$$

Подынтегральное выражение $p dV$ по смыслу означает элементарную работу газа при изменении его объема на dV . При расширении $dV > 0$,

поэтому элементарная работа газа положительна, при сжатии $dV < 0$ и $pdV < 0$ (отрицательна). Отрицательность элементарной работы газа означает совершение внешними силами положительной работы по его сжатию. На рисунке величина pdV численно равна площади заштрихованного участка. Следовательно, вся работа A_{12} численно равна всей площади под кривой процесса $1a2$ (площади фигуры $1a2V_2V_11$).

Далее газ из состояния 2 равновесно переходит в 1 вдоль линии $2б1$. Совершаемая здесь газом работа A_{21} отрицательная ($pdV < 0$ так как $dV < 0$), и численно равна площади под кривой процесса $2б1$, то есть площади фигуры $2б1V_1V_22$. (Сжатие газа происходит за счет положительной работы внешних тел). Суммарная работа A рабочего вещества за цикл равна $A_{12} + A_{21}$ и положительна, так как при одном и том же объеме давление при расширении выше, чем при сжатии.

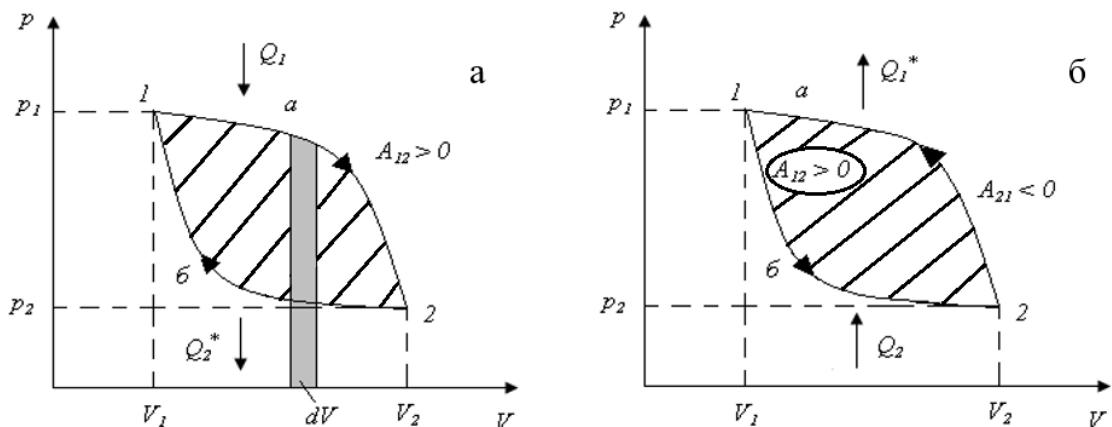


Рисунок 1 – Циклический процесс: прямой (а) и обратный (б)

С другой стороны, A_{12} численно равна площади фигуры под кривой прямого процесса, а A_{21} – отрицательному значению площади под кривой обратного процесса, следовательно, работа за весь цикл A численно равна площади заштрихованной фигуры, охватываемой линиями кругового процесса, изображенного на рисунке 1, а. Этот вывод является общим для любых равновесных циклов.

Проведем теперь выше рассмотренный цикл в обратном направлении (рисунок 1, б). Из состояния 1 газ равновесно расширяется вдоль линии $1b2$, производя работу A_{12} , численно равную площади под кривой $1b2$. Из состояния 2 он сжатием переводится в 1 вдоль линии $2a1$, совершая при этом отрицательную работу A_{21} , численно равную площади под кривой $2a1$. Суммарная A работа за цикл равна $A_{12} + A_{21}$ и отрицательна.

Важно отметить, что при протекании цикла в прямом направлении (рисунок 1, а) на участке $1a2$ рабочее тело получило от более нагретых тел (нагревателя) Q_1 теплоты, а на участке $2b1$ отдало менее нагретым телам Q_2^* теплоты. Причем Q_1 , Q_2^* и A связаны уравнением: $A = Q_1 - Q_2^*$. Иными словами, рабочее тело за цикл превратило в механическую работу количество теплоты, равное $(Q_1 - Q_2^*)$.

Когда цикл протекал в обратном направлении, то наблюдали противоположное: на участке $1b2$ рабочее тело от менее нагретых тел (охлаждаемые тела) получило Q_2 теплоты, а на участке $2a1$ отдало более нагретым телам Q_1^* теплоты за счет совершения внешними телами суммарной положительной работы $A^* = Q_1^* - Q_2 = -A$.

Более наглядно все это видно на примере цикла Карно для тепловых двигателей (рисунок 2, а).

Он состоит из четырех процессов: двух изотермических (протекающих вдоль 12 при неизменной температуре T_1 и вдоль 34 при постоянной температуре T_2) и двух адиабатических, то есть протекающих без обмена теплом между рабочим телом и внешними телами (процессы 23 и 41). Здесь T_1 – наиболее высокая, а T_2 – самая низкая температура, встречающаяся в цикле.

За один цикл рабочее тело совершает суммарную работу A , получив от нагревателя теплоту Q_1 при температуре T_1 и отдав холодильнику теплоту Q_2^* при T_2 . КПД цикла η , характеризующий эффективность преобразования

рабочим телом теплоты в работу, определяется уравнением:

$$\eta = \frac{A}{Q_1}. \quad (2)$$

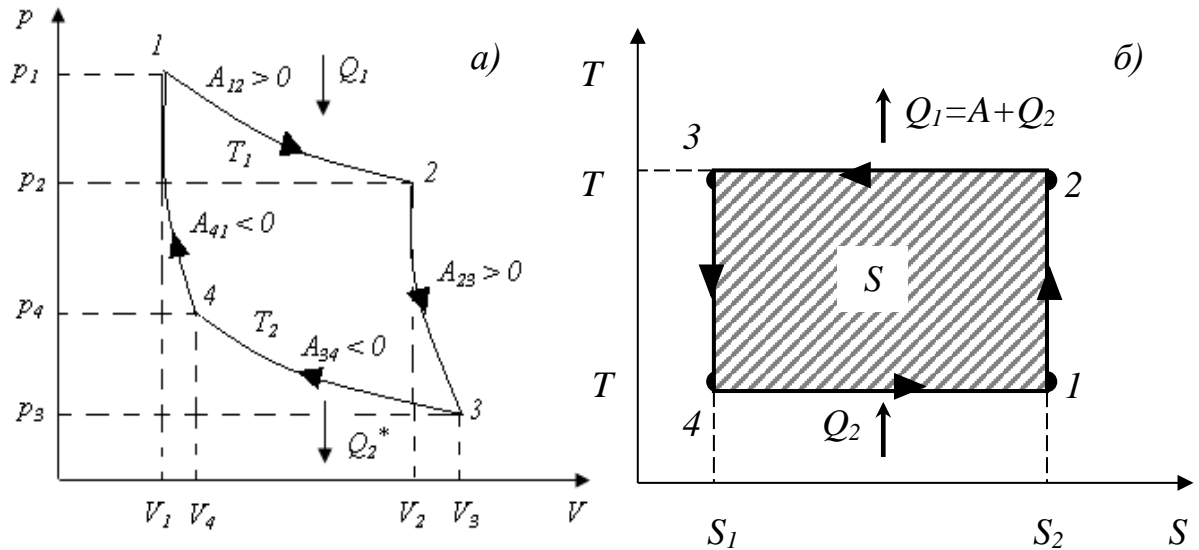


Рисунок 2 – Прямой цикл Карно на pV – диаграмме (а) и обратный цикл на TS – диаграмме (б)

Подставив в (2) значение A и Q_1 , приходим к соотношению

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (3)$$

Одна из формулировок II-го закона классической термодинамики гласит, что КПД любых тепловых машин, работающих по круговым процессам меньше 1. Следствием II-го закона классической термодинамики является утверждение о невозможности существования вечного двигателя второго рода, который бы за счет кругового процесса полностью превращал теплоту в работу. Даже в идеальном случае – цикле Карно с идеальным газом – в работу может быть превращена лишь доля теплоты $\eta \cdot Q_1$, а оставшаяся часть Q_2^* передается холодильнику.

КПД реальных тепловых машин всегда меньше величины $1 - \frac{T_1}{T_2}$, так как процессы в них не соответствуют идеальному циклу Карно. Если выше

рассмотренный цикл Карно совершить в обратном направлении (рисунок 2, б), то в итоге окажется, что при температуре T_2 рабочее тело приняло Q_2 ($Q_2 = Q_2^*$) теплоты, а при T_1 - отдало Q_1^* ($Q_1^* = Q_1$) теплоты более нагретым внешним телам. Таким образом, *холодильная установка*, работающая по такому циклу, будет отнимать тепло от охлаждаемого тела и передавать его внешним более горячим телам, затрачивая при этом работу извне. Например, в домашнем холодильнике рабочее тело (фреон) претерпевая циклические изменения под действием работы компрессора, потребляющего электроэнергию, охлаждает холодильную камеру (морозильник).

Рассмотрим процессы цикла (рисунок 2, б): линией 1-2 изображается адиабатный процесс сжатия *хладагента* (рабочего тела в холодильной установке), 2-3 – изотермический процесс с отводом теплоты Q_1 в окружающую среду. Линией 3-4 изображается адиабатный процесс расширения, а прямой 4-1 – изотермическое расширение с подводом теплоты Q_2 к хладагенту от охлаждаемого в холодильнике тела. Обратите внимание, что обратный цикл Карно описывается TS-диаграммой, где S – энтропия термодинамической системы, которая по определению равна $dS = \frac{\delta Q}{T}$. Тогда:

$$Q_1 = T_1(S_2 - S_1), \quad Q_2 = T_2(S_2 - S_1). \quad (4)$$

Введем понятие холодильного коэффициента для обратного цикла Карно:

$$\eta_x = \frac{Q_2}{(Q_1 - Q_2)} = \frac{T_2(S_2 - S_1)}{(T_1(S_2 - S_1) - T_2(S_2 - S_1))} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}. \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, **что значение холодильного коэффициента может быть больше единицы**, а также, что с увеличением температуры T_1 и с уменьшением температуры T_2 холодильный коэффициент уменьшается, и

$$\lim_{T_2 \rightarrow 0} \eta_x = 0. \quad (6)$$

Эффективность работы холодильных машин характеризуется холодильным коэффициентом, определяемым в виде отношения теплоты, взятой от холодильника и переданной нагревателю, к затраченной работе:

$$\eta_x = \frac{Q_2}{(Q_1 - Q_2)} = \frac{Q_2}{A^*}, \quad (7)$$

где A^* - работа за цикл, затраченная для отнятия Q_2 теплоты от менее нагретых тел и передачи ее более нагретым.

Холодильный коэффициент характеризует эффективность передачи теплоты. Он будет тем больше, чем большее количество теплоты будет взято от холодильника и передано нагревателю и чем меньше будет на это затрачено работы. Из (5) видно, что η_x тем меньше, чем ниже T_2 и выше T_1 . Следовательно, чем ниже температура охлаждаемого тела и выше нагрет теплоприемник, тем большую работу A^* надо совершить, чтобы отнять от охлаждаемого тела теплоту Q_2 .

Реальные охлаждающие устройства (холодильные машины) имеют холодильный коэффициент η_x , который всегда меньше $\frac{T_2}{T_1 - T_2}$. Он может сильно снизиться, в частности, за счет перетекания тепла от внешних более нагретых тел к охлаждаемому.

Из формулы (5) следует, что холодильная машина - это машина, непрерывно поддерживающая температуру тела ниже температуры окружающей среды. Холодильные машины подразделяются на газовые (воздушные), паровые, парожетторные, абсорбционные и машины, принцип действия которых основан на эффектах Пельтье. Абсорбционные машины основаны на использовании дроссельного эффекта Джоуля-Томсона.

В воздушной холодильной машине (относящиеся к классу газовых) в качестве холодильного агента используется атмосферный воздух. Эти установки не получили широкого распространения ввиду малого

холодильного коэффициента и сложности конструкции.

В парокompрессорных холодильных (относящиеся к классу газовых) установках рабочим телом являются пары различных веществ – аммиака NH_3 , углекислоты CO_2 , сернистого ангидрида SO_2 , фреонов (фторохлорпроизводных углеводородов). Ввиду простоты конструкции по сравнению с предыдущими, высокое значение холодильного коэффициента и большой надежности работы эти установки получили самое широкое распространение в технике.

Холодильные установки, принцип действия которых основан на эффектах Пельтье, максимально просты по конструкции, т.к. не имеют движущихся деталей. Они пока не получили широкого распространения из-за низких значений холодильного коэффициента, однако удобны в качестве лабораторных установок.

Тепловыми насосами называются устройства, с помощью которых теплота, забираемая от источника с низкой температурой, посредством затраченной извне работы отдается потребителю при более высокой температуре. Работа теплового насоса не отличается от работы холодильной установки.

Эффективность работы теплового насоса характеризуется отопительным коэффициентом φ , который определяется по формуле

$$\varphi = \frac{Q_1}{A} = \frac{Q_2 + A}{A}, \quad (8)$$

а если бы тепловой насос работал по обратному циклу Карно

$$\varphi = \frac{T_1}{T_1 - T_2}. \quad (9)$$

3 Методика эксперимента

Принцип действия данной лабораторной установки основан на эффекте Пельтье.

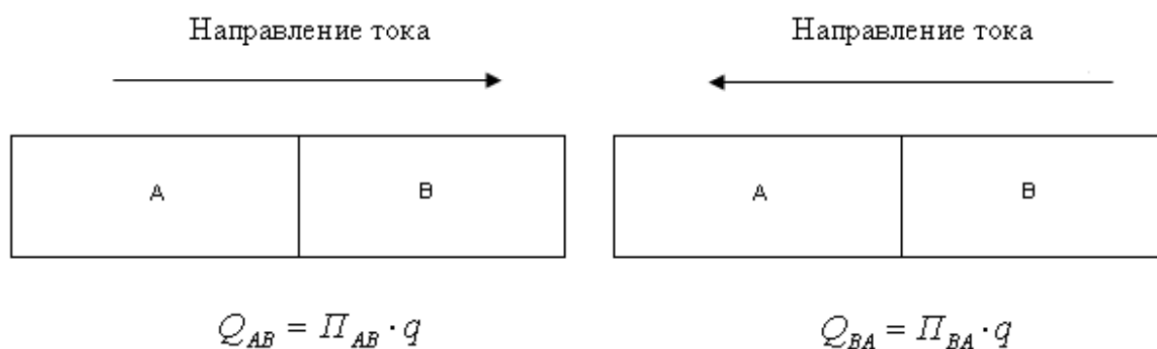
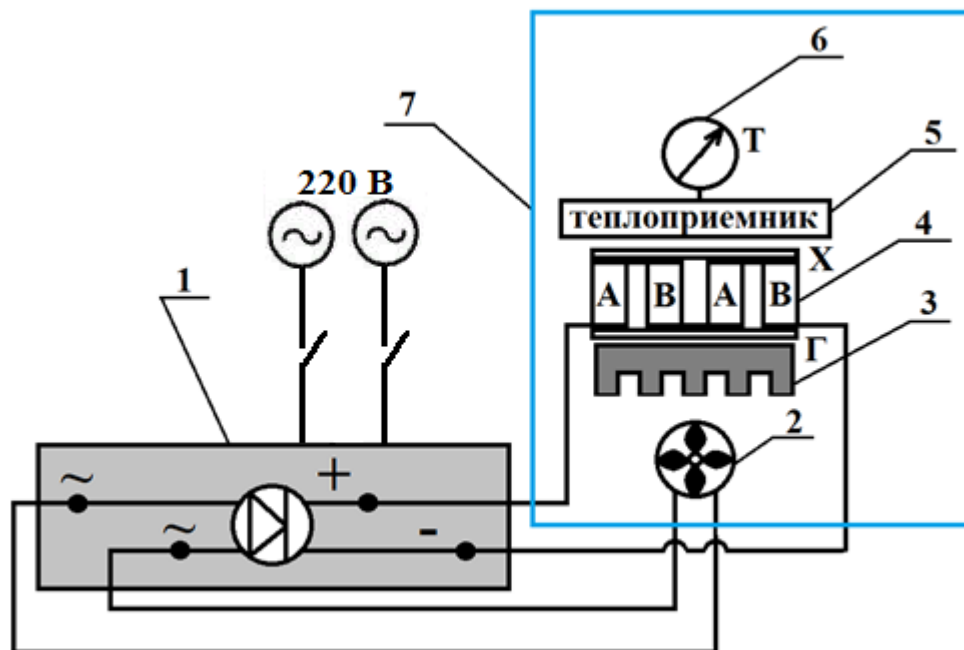


Рисунок 3 - Схема реализации эффекта Пельтье

Он заключается в том, что при протекании тока через спай AB разнородных металлов или полупроводников A и B в области контакта происходит выделение или поглощение тепла Q_{AB} (или Q_{BA}) (рисунок 3):

$$\Pi_{AB} = -\Pi_{BA}, \quad Q_{AB} = -Q_{BA}$$

Здесь q – заряд, прошедший через спай, Π_{AB} и Π_{BA} – коэффициенты Пельтье, зависящие от свойств контактной пары. Если $\Pi_{AB} > 0$, то протекание тока от A к B сопровождается выделением тепла Q_{AB} (нагреванием), а от B к A – поглощением Q_{AB} (охлаждением). При этом $Q_{AB} > 0, Q_{BA} < 0$.



1 – выпрямитель, 2 – кулер, 3 – радиатор, 4 – модуль Пельтье, 5 – теплоприемник (латунная пластинка), 6 – пружинный термометр, 7 – защитный кожух

Рисунок 4 – Принципиальная схема лабораторной установки, работающей по принципу Пельтье

Лабораторная установка состоит из выпрямителя, подключенного к сети переменного тока с напряжением 220 В (1), модуля Пельтье (4), кулера Theta 9 PWM (2) и радиатора (3). Модуль Пельтье 4 собран из чередующихся различных полупроводниковых столбиков А и В, соединенных пластинами. Материалы столбиков А и В подобраны так, что протекание тока по термоэлементу в одном направлении приводит к охлаждению верхних и нагреву нижних пластин (рисунок 4).

Теплоприемник 5 (латунная пластинка), находящийся в тепловом контакте с модулем Пельтье 4, охлаждается сам и охлаждает термометр 6.

При определенной разности температур наступает равновесие: сколько теплоты отнимается от охлаждаемого тела рабочим веществом за цикл, столько же подводится к нему (охлаждаемому телу) путем теплопередачи от

внешних наиболее нагретых тел. Нагревающийся нижний слой модуля Пельтье 2 находится в тепловом контакте с радиатором 3. Кулер 2, подключённый к источнику переменного напряжения, обдувает радиатор 3 потоками воздуха и уводит излишки тепла. Максимальная скорость вращения лопастей кулера 2 составляет 3200 оборотов в минуту.

Количественная характеристика эффективности работы холодильной установки – холодильный коэффициент η_x определяется выражением (из формулы 5):

$$\eta_x = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

4 Порядок выполнения работы

1. Измерить начальную температуру $T_1^{(1)}$ с помощью термометра, смонтированного в холодильную камеру и записать результат в таблицу 1 (в столбец первого эксперимента).

2. Подключить установку к сети 220 В.

3. Включить выключатель на задней панели установки. После этого должен засветиться дисплей измерительного устройства, на котором будет отображено значение текущей величины напряжения и силы тока.

4. Увеличить напряжение, *медленно* поворачивая ручку установки до упора, пока значение не достигнет 10-11 Вольт.

5. Измерить конечную температуру $T_2^{(1)}$, наблюдая за понижением температуры в холодильной камере в течение 5 минут. Записать значение в таблицу 1.

6. Вычислить холодильный коэффициент установки $\eta_x^{(1)}$ и записать результат в таблицу 1 (в столбец первого эксперимента).

7. Выключить выключатель на задней панели установки и *медленно* установить ручку в первоначальное положение. В течении 5 минут выждать, пока установка не придет в термодинамическое равновесие.

8. Измерить начальную температуру $T_1^{(2)}$ с помощью термометра, вмонтированному в холодильную камеру и записать результат в таблицу 1 (в столбец второго эксперимента).

9. Включить выключатель на задней панели установки. Наблюдая за понижением температуры в холодильной камере в течение 5 минут, измерить конечную температуру. Записать в таблицу конечную температуру $T_2^{(2)}$.

10. Вычислить холодильный коэффициент установки $\eta_x^{(2)}$ и записать результат в таблицу 1 (в столбец второго эксперимента).

11. Выключить выключатель на задней панели установки. Через 5 минут повторить пп. 8-10 и занести результаты в таблицу 1 (в столбец третьего эксперимента).

12. Выключить выключатель на задней панели установки.

13. Отключить установку от сети 220 В.

Таблица 1 – Результаты экспериментов по определению холодильного коэффициента установки

Первый эксперимент ($n=1$)		Второй эксперимент ($n=2$)		Третий эксперимент ($n=3$)	
Начальная температура $T_1^{(1)}$, С		Начальная температура $T_1^{(2)}$, С		Начальная температура $T_1^{(3)}$, С	
Конечная температура $T_2^{(1)}$, С		Конечная температура $T_2^{(2)}$, С		Конечная температура $T_2^{(3)}$, С	
Холодильный коэффициент, $\eta_x^{(1)}$		Холодильный коэффициент, $\eta_x^{(2)}$		Холодильный коэффициент, $\eta_x^{(3)}$	

Определяем значение температуры охлаждения для каждого эксперимента:

$$T_o^{(1)} = T_1^{(1)} - T_2^{(1)} \text{ - для первого эксперимента;}$$

$$T_o^{(2)} = T_1^{(2)} - T_2^{(2)} \text{ - для второго эксперимента;}$$

$$T_o^{(3)} = T_1^{(3)} - T_2^{(3)} \text{ - для третьего эксперимента.}$$

Определяем среднее арифметическое значение температуры охлаждения для трех экспериментов:

$$\bar{T}_o = \frac{T_o^{(1)} + T_o^{(2)} + T_o^{(3)}}{3}$$

Абсолютную ошибку температуры охлаждения найдем как:

$$\Delta T_o = \sqrt{T_{np}^2 + \frac{(T_o^{(1)} - \bar{T}_o)^2 + (T_o^{(2)} - \bar{T}_o)^2 + (T_o^{(3)} - \bar{T}_o)^2}{3 \cdot 2}}$$

Значение приборной ошибки термометра составляет $0,5^0$ С.

Получим значение доверительного интервала для температуры охлаждения: $T_o = \bar{T}_o + \Delta T_o$.

Определяем значение холодильного коэффициента установки для каждого эксперимента:

$$\eta_x^{(1)} = \frac{T_2^{(1)}}{T_1^{(1)} - T_2^{(1)}} \text{ - для первого эксперимента;}$$

$$\eta_x^{(2)} = \frac{T_2^{(2)}}{T_1^{(2)} - T_2^{(2)}} \text{ - для второго эксперимента;}$$

$$\eta_x^{(3)} = \frac{T_2^{(3)}}{T_1^{(3)} - T_2^{(3)}} \text{ - для третьего эксперимента.}$$

Среднее значение холодильного коэффициента установки:

$$\eta_x = \frac{\eta_x^{(1)} + \eta_x^{(2)} + \eta_x^{(3)}}{3}.$$

5 Вопросы для самопроверки

1. Поясните цель и порядок выполнения работы; обсудите полученные Вами результаты.
2. Поясните физическое содержание эффекта Пельтье.
3. Дайте определение равновесного и неравновесного состояниями термодинамической системы.
4. Опишите термодинамические процессы: равновесный, неравновесный, обратимый, необратимый.
5. Дайте определение круговым процессам, поясните их графическое изображение.
6. Выведите формулу для вычисления КПД цикла Карно.
7. Изобразите графически обратный (холодильный) цикл Карно. Как вычисляется эффективность холодильного цикла?
8. Поясните, какие устройства называются тепловыми насосами? Какова их эффективность?

6 Рекомендуемая литература

1. Савельев, И.В. Курс общей физики. Том I. Механика, колебания и волны, молекулярная физика / И.В. Савельев. – Москва: Издательство «Наука», 1970. – 517 с.
2. Умергалин, Т.Г. Методы расчетов основного оборудования нефтепереработки и нефтехимии: учебное пособие / Т.Г. Умергалин, Ф.М. Галиаскаров. – Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2007. – 236.
3. Ульянов, Б.А. Процессы и аппараты химической технологии / Б.А. Ульянов, В.Я. Бадеников, В.Г. Ликучёв. – Ангарск: Издательство Ангарской государственной технической академии, 2006. - 743 с.
4. Теплотехника. учебник для вузов / Под ред. А. П. Баскакова. - 2-е изд., перераб. - Москва: Энергоатомиздат, 1991. - 224 с.